

氏 名	田 中 由 英
学 位 の 種 類	博 士 (理 学)
学 位 番 号	第 4434 号
学位授与年月日	平成 16 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当者
学 位 論 文 名	量子ドット系の輸送現象における電子相関の効果 (Effects of Electron Correlation on the Transport through Quantum Dot Systems)
論文審査委員	主 査 教 授 小 栗 章      副主査 教 授 村 田 恵 三 副主査 教 授 谷 垣 勝 己      副主査 助教授 坪 田 誠

### 論 文 内 容 の 要 旨

近年、量子ドット、量子細線、ナノメータサイズの原子鎖等の微小な系における量子輸送現象がさかんに研究されており、これらの系ではクーロン・ブロッケイド、近藤効果、朝永・Luttinger 流体としての振る舞い等、電子間相互作用の効果が本質的である現象が見出されている。電子相関は、このような多彩で興味深い現象を引き起こすが、理論的には複雑な部分があり、特に輸送現象に関しては近似計算における電流の保存等の微妙な問題がある。本研究の目的は、量子ドット系に電子相関の効果を系統的な手法に基づき、詳細に調べることにある。本研究では、特に量子ドット超格子系の電気伝導、および単一量子ドットにおける Josephson 効果を調べた。

我々はまず、複数の量子ドットから構成される超格子の直流コンダクタンスを、左右のリードに接続された Hubbard モデルを用い、量子ドット内の短距離クーロン斥力  $U$  に関する 2 次の自己エネルギー補正を取り入れた計算を行った。量子ドット系ではゲート電圧  $d$  により電子数が変化するが、我々の計算は電子数が奇数個のときは近藤共鳴、偶数個のときは Mott-Hubbard 絶縁体的な振る舞いを良く記述する。特に、量子ドット超格子では  $d$  の変化に対して局所 Fermi 流体としての多体補正を受けた複数の共鳴状態が順次 Fermi 準位を横切ることによるピーク構造がコンダクタンスに現れる。このピーク構造は、自己エネルギー補正から定義される準粒子の有効ハミルトニアン固有値の振る舞いにより説明され、異方性、乱雑さなどの超格子構造の詳細に敏感であることが分かった。

我々はさらに、2 つの超伝導体に接続された単一量子ドット系における Josephson 効果についての研究を行った。ここでは、Anderson モデルに基づき、Wilson の数値くりこみ群 (NRG) を用いて、基底状態の性質を精密に調べた。その結果、超伝導秩序パラメータの位相差は、スピン-重項の基底状態を不安定にする傾向があり、位相差の変化により一重項から二重項基底状態への量子相転移が起こり得ることが分かった。この時、転移点において Josephson 電流の向きが不連続に変化する。我々は、これらの状況を、超伝導ギャップ、近藤温度等の値に関する広いパラメータの領域において詳細に調べている。

### 論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

近年、量子ドット、量子細線、ナノメータサイズの原子鎖等の微細な系における輸送現象がさかんに研究されている。これらの系ではクーロン・ブロッケイド、近藤効果、朝永・Luttinger 流体的振る舞い等、量子力学的な波動性および電子相関の効果が本質的である現象が見出されている。相互作用の効果は電子の粒子性を強調するが、理論的には取り扱いが難しく、量子系の低エネルギーの振る舞いを正しく調べるには特別な注意を要する。本研究の目的は低温における量子ドット系の輸送現象における電子相関の効果を系統的に調べるこ

にある。

本研究ではまず、複数の量子ドットから構成される超格子のコンダクタンスをリードに接続されたHubbardモデルを用いて調べた。試料とリードとの接続は測定的手段にとどまらず、系全体の基底状態および低温の性質に強い影響を与える。クーロン斥力 $U$ に関する自己エネルギーを2次摂動の範囲で調べた結果、コンダクタンスに対する電子相関の効果は、拡張された局所Fermi流体における準粒子への多体補正として記述されることが示された。特に、自己エネルギー補正から定義される準粒子の有効ハミルトニアンにより輸送係数が決定され、その固有値の振る舞いから電子数が奇数個の場合における近藤共鳴、偶数個の場合におけるMott-Hubbard絶縁体的傾向、および量子ドット超格子の異方性、乱雑さの影響等が説明されることが明らかにされた。

本研究ではさらに、量子ドットに接続されたリードが超伝導体である場合に起こり得る、Josephson効果と近藤効果の競合が調べられた。そこでは基底状態の性質が、Anderson模型に基づき、Wilsonの数値くりこみ群(NRG)を用いて精密に計算された。2つリードの超伝導秩序パラメータの位相差は、スピン一重項の基底状態を不安定にする傾向があり、位相差の変化により一重項から二重項の基底状態へ量子相転移が起こり得る。本研究では、広いパラメータ領域における基底状態の相図が明らかにされ、この量子相転移点におけるJosephson電流の向きの不連続な変化が詳細に調べられた。

以上のように、本研究では系統的な理論計算に基づき微細な系の電気伝導における量子効果および電子相互作用の効果の一面が明らかにされた。量子ドット系の輸送現象における電子相関に関する理論の発展に寄与するものであり、博士(理学)の学位を授与するに値するものと判定する。